第46卷 第10期
2023年10月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 10
Oct. 2023

尉犁-且末沙漠公路沿线风沙环境特征及沙害防治对策研究

郑智鹏， 马奔腾， 程建军， 魏晋铭

（石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832003）

摘 要： 尉犁-且末沙漠公路（简称尉-且沙漠公路）穿越塔克拉玛干沙漠腹地，对于实现新疆社会稳定和长治久安提供有力交通保障。风沙危害是尉-且沙漠公路建设和通车的主要危害，亟需采取防治措施对该公路进行保护。基于ERA5风况数据，全方位分析了尉-且沙漠公路沿线的风能环境，并结合遥感影像分析沿线的沙丘移动特征，系统阐述了沿线遭受的风沙危害，在此基础上对该沙漠公路提出了有针对性的风沙防治措施。结果表明：（1）沿线年均起沙风速介于6.03~6.64 $m\cdot s^{-1}$之间，年起沙风频率介于14.73%~30.44%之间。（2）起沙风主要发生在春夏两季中。起沙风主方向以ENE、E为主。（3）沿线年输沙势介于106.48~293.70 VU之间，存在低、中两种风能环境，年方向变率指数介于0.49~0.74之间，属中比率，年合成输沙方向介于213.48°~255.94°之间，各方向季输沙势与季起沙风频率变化特征一致，方向变率指数呈现明显季节变化特征。风能环境的时空变化特征造成了沙丘移动速率的空间差异性，在起沙风作用下，沿线遭受不同程度的风沙危害，沿线按照阻-固原则，有针对性地设置工程、生物并存的防治措施。研究结果全面概述了尉-且沙漠公路沿线的风沙环境特征及危害，为该公路沿线防治措施的设置及后续改进优化提供理论依据。

关 键 词： 起沙风；输沙势；风沙危害；防治对策；沙漠公路

文章编号： 1000－6060(2023)10－1680－12(1680～1691)

塔克拉玛干沙漠位于塔里木盆地，是中国面积最大的沙漠，也是世界第二大流动沙漠[1-2]，沙源丰富，内部多流动沙丘，风沙环境恶劣[3]。尉犁-且末沙漠公路（简称尉-且沙漠公路）穿越塔克拉玛干沙漠东部，连接南疆重镇，“环塔”城镇带中的重要节点尉犁县和且末县，总体走向为南北向，路线长度约332 km，该公路建设对新疆的社会经济发展具有重要意义。然而，在丰富沙源与高频率起沙风的共同作用下，沙漠公路的安全运行遭受严重威胁。根据勘察报告数据整理得，沿线存在风沙影响的路段共计约305 km，其中危害严重路段达161.3 km、危害中等路段约9 km、轻微路段约139 km，风沙危害对沙漠公路的建设和通车有重要影响，风沙危害防治是该沙漠公路建设及维护需要解决的关键性问题，亟需对该区域风沙环境特征进行系统研究，并据此提出公路沙害防治对策。

现有关于沙漠区域内风沙环境的研究较为丰富[4-10]，但风沙活动具有时空变化特征，不同沙漠、同一沙漠不同区域的风沙环境和输沙活动强度各不相同[11-16]。因此，为有针对性地进行尉-且沙漠公路风沙防治，必须对沿线的风沙环境特征进行系统研究。沿线的流动沙丘主要为细砂、粉砂组成，沙粒的粒径皆小于0.25 mm。因此，只需要风速大于4.0 $m\cdot s^{-1}$即可造成风沙输移，而沿线风速大于4.0 $m\cdot s^{-1}$的大风天气是很常见的，尤其在春夏两季输沙活动最为强盛，风沙对公路的危害较为明显，易对路基造成沙埋危害。

风沙灾害的防治主要方法是通过设置障碍物

收稿日期： 2022-11-19； **修订日期：** 2022-12-18

基金项目： 国家自然科学基金项目（52168065）资助

作者简介： 郑智鹏（1998-），男，硕士研究生，主要从事风沙灾害防治研究. E-mail: 1342345526@qq.com

通讯作者： 程建军（1979-），男，博士，教授，主要从事风沙环境与风沙灾害防治研究. E-mail: chengdesign@126.com

干扰气流、减少风沙流的输移、增加地表粗糙度、阻止沙丘前移等[17-22]，不同类型的防治措施作用效果有所不同，方格沙障最外围风速降低最明显[23]，且方格沙障内会形成不均布的风沙流涡流，沙粒在涡流的作用下堆积，风沙输移率降低[17]。阻沙沙障的高度和其孔隙率是阻沙效果的重要因素，多道沙障共同设置也会产生较好的阻沙效果[24]。尉-且沙漠公路沿线主要的沙害形式为风蚀和沙埋，沿线按阻-固结合的原则进行风沙防治，主要措施为利用高立式沙障、芦苇草方格、植物防沙等。防沙体系的建立需要综合多方面因素，风既是沙丘移动的动力因素，也是风蚀灾害的致灾因素[25]。沙漠地区的交通线路经常受到风沙的侵蚀，同时风沙环境又具有很强的时空特征，因此对沙漠道路的风沙防治不能一概了之，有必要综合多种因素分析沿线不同位置的风沙灾害程度，因地制宜地制定风沙治理措施。因此，本文利用ERA5风数据结合遥感影像，系统分析了沿线风能环境和风沙输移的时空特征，深入讨论了风沙灾害形成的原因及其对该地区公路运行产生的影响，对该沙漠公路有针对性的进行风沙防治体系的设置，对该区域沙害防治有重要意义，也可为其他沙漠地区的交通线路防沙治沙提供经验。

1 研究区概况

尉-且沙漠公路(38.00°~41.00°N,85.21°~86.22°E)位于新疆南部的塔里木盆地（图1），路线穿越塔克拉玛干沙漠腹地，总体走向为南北向，也是继塔中沙漠公路和阿拉尔-和田沙漠公路之后跨越塔克拉玛干大沙漠的第3条沙漠公路，公路起点位于尉犁县、终点位于且末县，海拔介于885~1157 m之间。塔克拉玛干沙漠春季多大风、沙暴和浮尘天气，夏季高温干燥，秋季气温下降迅速，冬季少雪干冷。沙漠公路沿线年平均气温为10.1~10.6 ℃，年极端最高气温41.5~42.2 ℃，年极端最低气温-26.4~-30.9 ℃，年平均降雨量18.6~40.8 mm，年平均蒸发量2507~2910.5 mm。由于该公路绝大部分路段分布在沙漠区（K22+500—K329+000），仅路线起点、终点路段分布在农耕区和荒地区沙害不明显，其他路段均存在不同程度的沙害现象，主要危害形式为沙埋和风蚀。沙害危害严重段主要分布在流动沙丘及复合型沙丘段，以沙埋危害为主；危害中等段主要分布在部分半固定半流动沙丘及较小规模的沙丘盆地中，仍以沙埋危害为主；危害轻微段主要分布在一些较宽广的盆地中，以扬沙及路基阻风积沙危害为主。基于该公路经行范围内卫星影像的更新频率及影像质量，结合实地勘察资料，沿线优选出5段具有风沙环境代表性的区段（图1），以分析沿线风沙输移特征并为沿线风沙防治措施的设置提供理论依据。

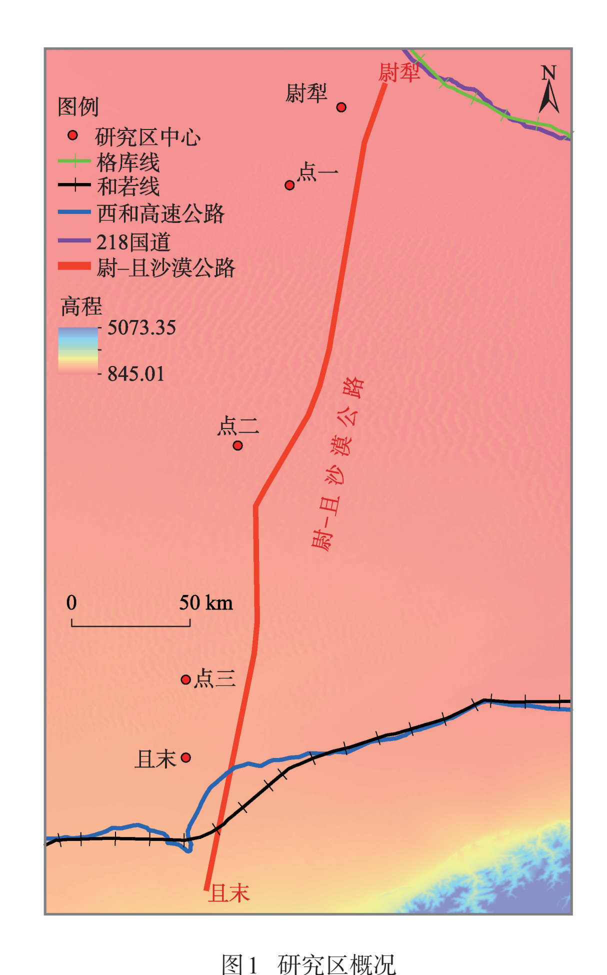


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据与方法

2.1 遥感影像

沿线采用的遥感影像从ArcGIS历史影像中获得，沿线各区段内获取2个时期的影像，不同区段内遥感影像的更新频率不一致，为了能更好地说明沙丘移动特征，各区段内获取的2个时期的遥感影像间隔大于1 a，获取的遥感影像信息如表1所示。

表1 沙漠公路各区段遥感影像信息

Tab. 1 Remote sensing image information of each section of desert highway

区段名	日期(年-月-日)	中心坐标	区段名	日期(年-月-日)	中心坐标
尉犁	2012-04-20	86.1°E,41.0°N	点三	2014-10-12	85.5°E,38.8°N
	2019-09-04			2017-10-13	
点一	2012-08-26	85.9°E,40.7°N	且末	2014-10-12	85.5°E,38.5°N
	2019-09-14			2017-10-13	
点二	2012-05-10	85.7°E,39.7°N			
	2021-05-20				

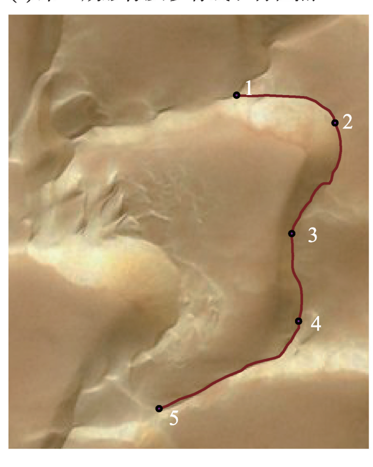
2.2 风况数据

沿线风况数据为ERA5,从ECMWF官网(https://cds.climate.copernicus.eu/)获取,其时空分辨率分别为1 h和0.25°×0.25°。其优势在于可以表现出沿线任意1点的风况环境,使得风沙防治能够更精准地进行。所获得的ERA5风况数据的形式为U分量(经度风速)和V分量(纬度风速),距地面高度10 m,时间范围包含所有影像的最早期和最晚期,即2012—2021年。

2.3 沙丘移动

为消除遥感影像的偏移误差,首先对影像进行几何校正以满足精度需求。通过目视解译的方法提取出沙丘脊线,以沙脊线的移动作为沙丘移动的判断依据,沿沙丘脊线进行特征点选择,点位应沿脊线均匀分布且选择脊线明显特征处如迎风坡底、背风坡底等(图2);以每座沙丘上的特征点移动速率的和与影像时间跨度的比值作为该沙丘的移动速率;以每座沙丘上的特征点移动角度的平均值作为该沙丘的移动方向;以区段内沙脊线的平均移动速率总和与年份跨度的比值作为该区段的沙丘移动速率;以沙脊线上所有特征点的角度平均值作为该沙丘的移动方向。

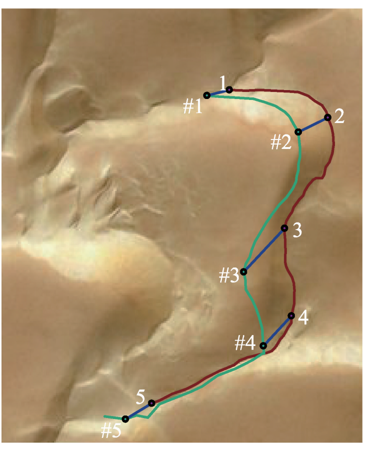
(a) 第一期影像及沙脊线、特征点



(b) 第二期影像及沙脊线、特征点



(c) 沙丘移动计算



注:1~5和#1~#5分别为第一期影像和第二期影像上的特征点。

图2 沙脊线移动示意图

Fig. 2 Diagram of sand beamline movement

2.4 风能环境

根据风况数据计算出风速和风向,统计风速≥4.5 m·s^{-1}的起沙风小时数,计算出年、季、月时间尺度里16个方向的起沙风频率并利用风速、风向进一步计算出输沙势(DP),DP计算公式为[26]:

$$DP = V^2(V - V_t) \quad (1)$$

式中:DP为输沙势(VU);V、V_t分别为起沙风速和临界起沙风速(节,1节≈0.514 m·s^{-1});t为起沙风时间。

以起沙风小时数与总观测小时数的百分比表示,本文起沙风速采用4.5 m·s^{-1}[27]。根据式(1)的定义,将起沙风的风速划为4.5 m·s^{-1}≤V<7 m·s^{-1}、7 m·s^{-1}≤V<9 m·s^{-1}、9 m·s^{-1}≤V<11 m·s^{-1}、11 m·s^{-1}≤V<13 m·s^{-1}、

$V \geq 13\ m \cdot s^{-1}$ 5个风速级，并分别求出5个风速级的权重因子，进而计算出5处区段的输沙势；16个方向输沙势矢量求和得到合成输沙势（RDP，VU）和合成输沙方向（RDD，VU）；RDP/DP为方向变率指数，用来表征一个地区起沙风的方向变率。根据Fryberger[26]对风能环境的划分：DP>400 VU为高风能环境，DP介于200~400 VU之间为中风能环境，DP<200 VU为低风能环境；RDP/DP≤0.3为小比率，RDP/DP介于0.3~0.8之间为中比率，RDP/DP≥0.8为大比率，RDP/DP越大表明该地区风向越稳定，反之越波动。各指数计算公式如下：

$$\mathrm{RDP}=(X^2+Y^2)^{1/2} \tag{2}$$

$$X=\sum(\mathrm{VU}_i)\sin\alpha_i \tag{3}$$

$$Y=\sum(\mathrm{VU}_i)\cos\alpha_i \tag{4}$$

$$\mathrm{RDD}=\arctan(X/Y) \tag{5}$$

$$\mathrm{RDP/DP}=\begin{cases}\leq 0.3, & 小比率\\ 0.3\sim0.8, & 中比率\\ \geq 0.8, & 大比率\end{cases} \tag{6}$$

式中：VU_i为i方向的输沙势（VU）；α_i为i方向与正北方向顺时针的夹角（°）；X、Y分别为输沙势横向分量、纵向分量的和。

3 结果与分析

3.1 起沙风特征

3.1.1 年起沙风特征 尉-且沙漠公路沿线平均起沙风速和起沙风频率空间变化（图3a）分析可知，尉犁至且末年起沙风频率呈现出递增趋势，由尉犁的14.73%过渡至且末的30.44%；沿线年平均起沙风速在空间上表现为先增后减的趋势，其中最大值为6.64 $m \cdot s^{-1}$，发生在点二区段内，最小值为6.03 $m \cdot s^{-1}$，发生在尉犁区段内。

起沙风方向的变化重塑沙丘的形态，重塑的过程消耗着风能，影响着沙丘的移动速率和方向。尉-且沙漠公路沿线存在着明显的主次风（图3b），主风向为NE、ENE和E，尉犁至且末ENE和E方向的起沙风频率急剧增大。尉犁和点一2个区段内，整体起沙风频率较小，各个方向起沙风频率也较小，2处区段内以NE和E风为主，W风占据一定的比例；点二区段内ENE和E方向的起沙风频率出现了较大增幅；点三和且末2处区段内，NE和ENE起沙风已占据主导地位。

各方向平均起沙风速出现了明显的波动（图3c），尉犁和点一2区段的平均起沙风速呈U字型，最大起沙风速发生在NNW方向；点二至且末3处区段内，平均起沙风速表现出双波峰态势，主要集中在ENE、E和WSW方向上。

综合来看，尉犁至且末风况环境越来越恶劣，随着起沙风频率的不断增大，风沙灾害的威胁也在逐步上升。尉犁、点一区段内风环境主要表现为低频弱风，虽然NW、NNW的平均起沙风速较高，但2个方向的起沙风频率极低，引起风沙灾害的可能性很小。点二至且末3处区段风环境主要表现为高频大风趋势，NE、ENE和E方向的起沙风频率占据主导地位，3个方向的平均起沙风速也达到了相应的峰值，SW和WSW方向的平均起沙风速虽然达到了1个极值，但是其对应的起沙风频率却很小，且2个方向与NE、ENE互为相反方向，风况环境相对比较复杂。点二至且末3处区段内风况环境较为恶劣，造成风沙灾害的几率相应会增加。

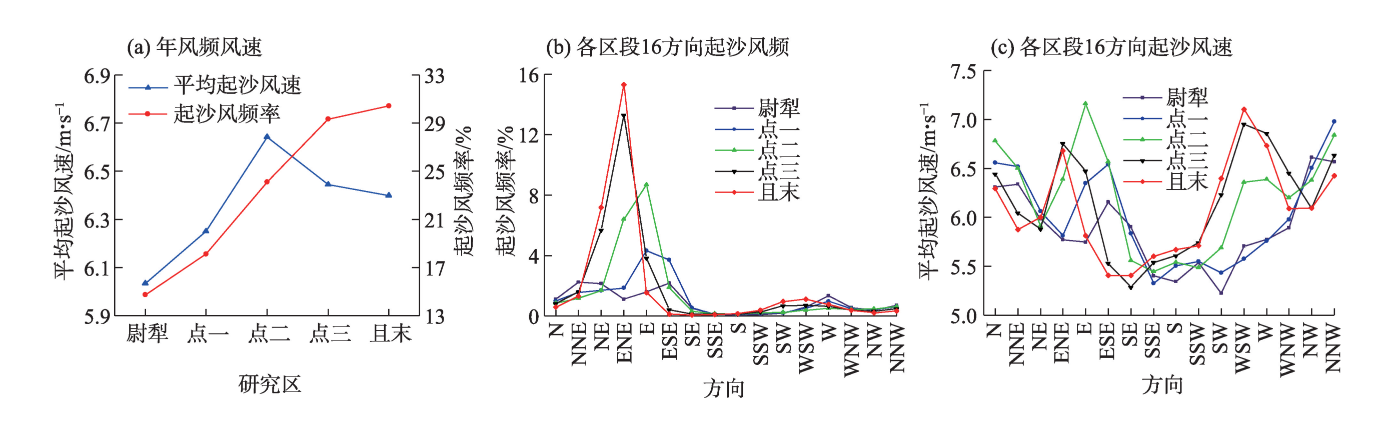


图3 各区段年起沙风特征

Fig. 3 Characteristics of annual sand wind in each section

3.1.2 季起沙风特征 尉-且沙漠公路沿线季起沙风呈现出时空变化特征。时间上，沿线起沙风频率春夏秋冬四季呈现出先增后减的趋势(图4a)，夏季的起沙风频率达到最大值，冬季为最小值，平均起沙风速春夏秋冬四季依次降低(图4b)。空间上，沿线平均起沙风速尉犁至且末先增后减，与年平均起沙风速表现出良好的一致性，尉犁至且末起沙风频率整体呈现递增趋势，夏季点三区段起沙风频率大于且末起沙风频率。

由图5可知，沿线5处区段内，各方向上起沙风频率波动变化，整体表现出春夏秋冬四季递减的趋势，与各区段年起沙风特征(图3)有良好的一致性。尉犁四季的起沙风主风向为NNE和ESE，但沿线整体来看，2个方向的起沙风频率占比较小。点一区段起沙风主方向为E，各方向起沙风频率变化趋势与年起沙风频率变化情况保持一致。点二区段起沙风主方向为E，点三、且末2处区段内起沙风主方向为ENE，点二至且末之间，E和ENE方向的起沙风频率急剧增长，与年起沙风频率有着良好的一致性。

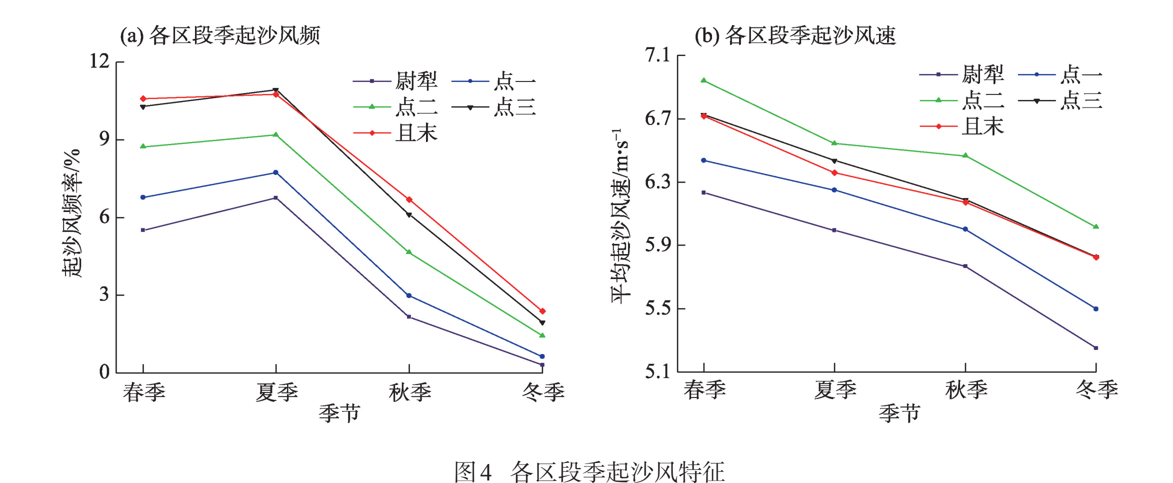


图4 各区段季起沙风特征

Fig. 4 Characteristics of seasonal sand-driving winds in each section

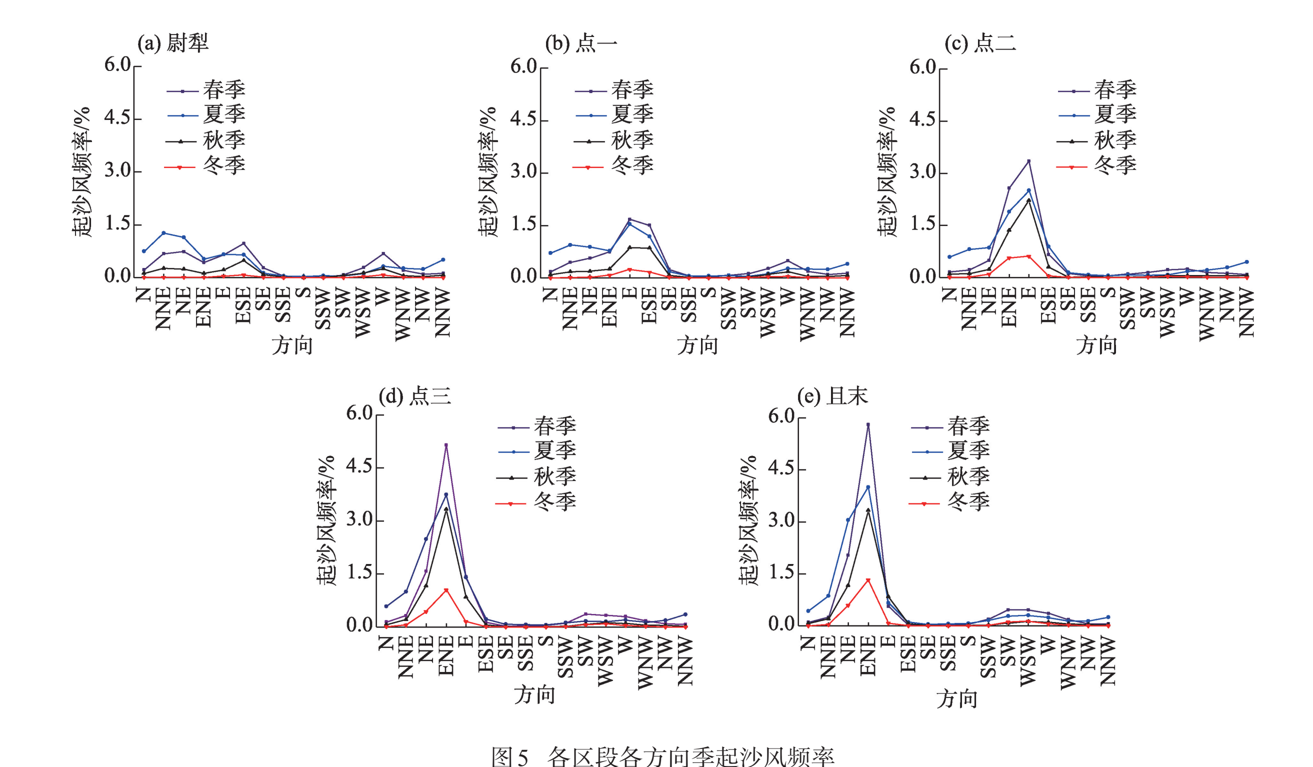


图5 各区段各方向季起沙风频率

Fig. 5 Frequency of seasonal sand-driving wind in each direction of each section

由图6可知，沿线5处区段内，各方向上平均起沙风速波动变化，整体表现出春夏秋冬递减的趋势，与各区段年起沙风特征（图3）有良好的一致性。尉犁和点一区段内四季的平均起沙风速有着相似的变化趋势，整体比较平稳，在两端稍有抬升，点二至且末3处区段出现明显的波动，主要集中在ENE、E和WSW方向。春夏秋三季平均起沙风速变化趋势相似，各区段内冬季平均起沙风速各方向上存在较大波动，尉犁至点二区段内的S方向与点三至且末区段内的S、SSE方向在冬季无起沙风情况。

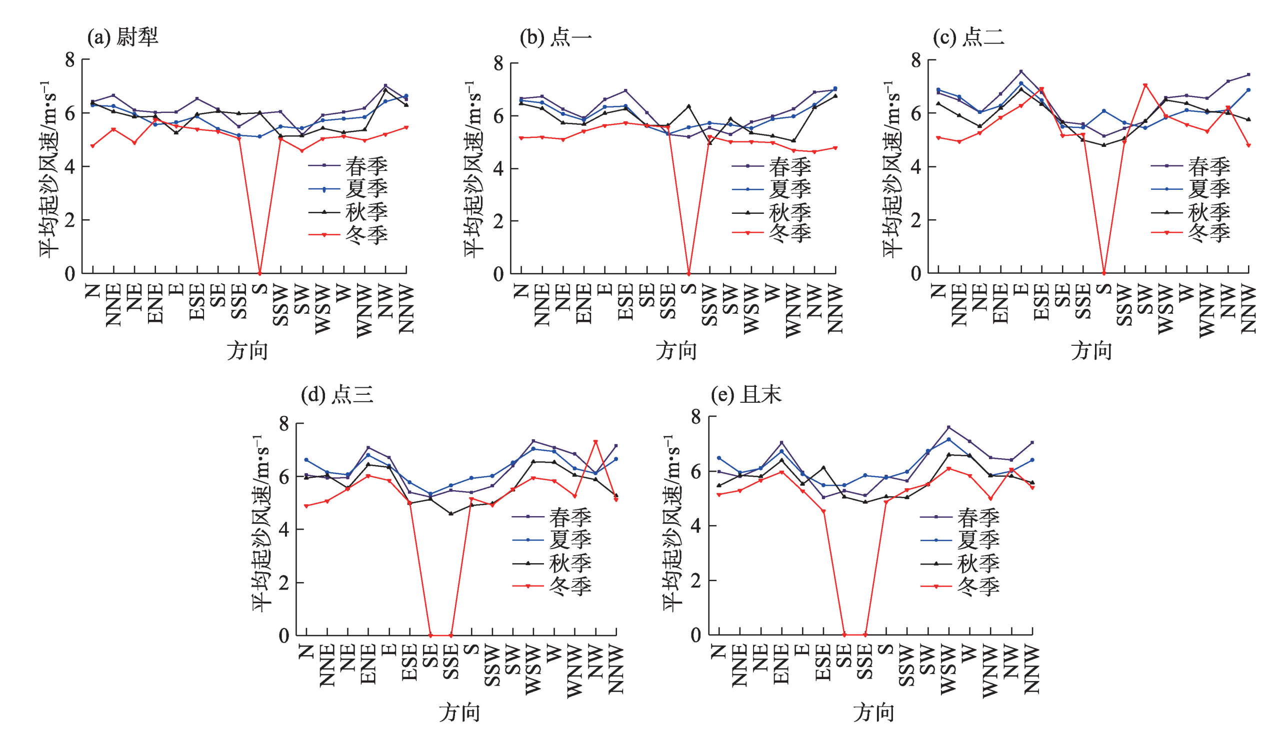


图6　各区段各方向季平均起沙风速

Fig. 6　Seasonal average sand-driving wind speed in each direction of each section

3.1.3　月起沙风特征　尉-且沙漠公路沿线各月起沙风频率及风速变化特征存在差异。如图7a所示，沿线5处区段内起沙风频率变化趋势较为一致，呈M型，分别在4、5月和7、8月达到峰值，1—5月起沙风频率整体上升，7、8—12月呈下降趋势，月均起沙风速最值出现时期与月起沙风频率出现最值的时期一致；沿线区段内月平均起沙风速在5月达到最大值（图7b），并逐步降低，至11月时稍有提升。综合图7来看，5月风沙环境是最为恶劣的，风况表现形式为高频大风，在此风况条件下，沿线风沙灾害的几率大幅上升。

3.2　DP特征

3.2.1　年DP特征　沙漠公路沿线年DP介于106.48~293.70 VU之间，最大、最小值分别发生在尉犁和点三区段内，根据风能环境的划分，尉犁、点一区段属低风能环境，点三至且末区段属中风能环境。RDP/DP说明沿线风向变率中等，数据显示，尉犁、点一区段内RDP/DP分别为0.49和0.56，表明2处区段内的风向较易变化，因此造成2处区段内RDP相对DP较小；点二至且末RDP/DP说明3处区段内风向较为稳定，由此造成的风沙灾害的发生可以很好地被预测，从而有针对性的进行防治。尉犁、点一2处区段内无明显主导方向，点二至且末3处区段内都表现出了某一方向单一主导的趋势，点二区段内主导方向为E（DP=136.53 VU），点三、且末区段内主导方向为ENE（DP分别为160.75 VU、174.90 VU）。图8直观的表现出各区段内的输沙活动强度，尉犁、点一2处区段内的输沙情况相对复杂，表现为多个方向输沙，点二至且末3处区段输沙活动强烈，且集中在1个方向输沙，因此极易在公路的一侧引起较为严重的风沙灾害，但同时较为稳定的输沙活动方向降低了风沙防治的复杂度。

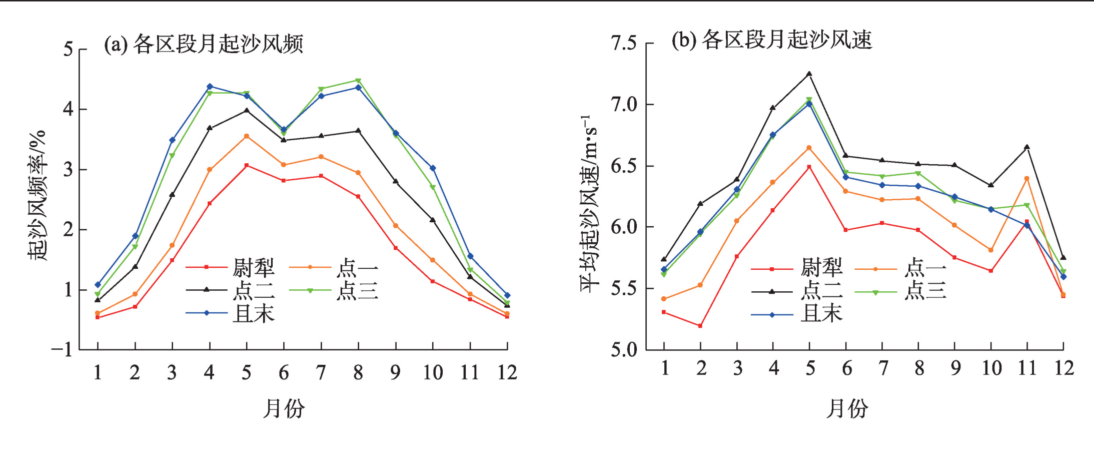
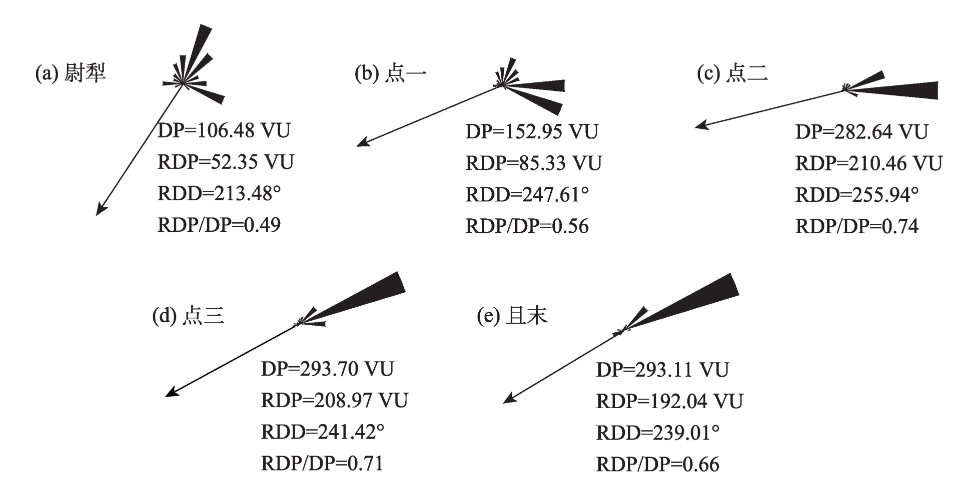


图7 各区段月起沙风特征

Fig. 7 Characteristics of monthly sand wind in each section



注:DP为输沙势;RDP为合成输沙势;RDD为合成输沙方向;RDP/DP为方向变率指数。下同。

图8 各区段年DP特征

Fig. 8 Annual DP characteristics in each section

3.2.2 季DP特征 沙漠公路沿线DP呈现出时空变化特征,季DP变化特征与年DP变化特征有良好的一致性(图9)。空间上,尉犁至且末DP递增,春季介于46.91~132.91 VU之间,夏季间于46.49~104.01 VU,秋季介于12.14~51.87 VU之间,冬季间于0.94~13.61 VU,时间上,各区段内春夏秋冬DP依次递减。空间上,沿线区段在同季节时间内RDP波动变化,时间上,各区段RDP按春夏秋冬四季递减,春夏两季为主要的输沙活动季节。区段内,春夏秋冬四季RDD动态变化,其中尉犁、点一2区段内RDD波动较大,点二至且末RDD在春夏秋冬四季内整体较为一致,说明此3处区段内输沙活动方向稳定,公路的上风侧风沙灾害威胁程度较大。

沿线四季的RDP/DP如图10所示,其中尉犁区段内的RDP/DP波动范围最大,冬季RDP/DP小于0.3,春秋两季的RDP/DP在0.4附近,说明尉犁区段风向极易发生变化,因此造成输沙方向多变。点一至且末4处区段整体处在中等变率之间,风向较为稳定,点二区段的秋冬两季RDP/DP甚至超过了0.8,达到了高变率,风向稳定,不易变化,输沙方向也较为固定。空间上来看,沙漠公路沿线夏季整体RDP/DP较小,秋季整体RDP/DP较大,说明沿线夏季输沙活动方向较复杂,秋季输沙活动较稳定。

尉-且沙漠公路沿线的春夏秋冬四季DP依次减小,输沙活动强度逐渐减弱,季DP主导方向与年DP主导方向一致;春夏季DP活动较为强烈,春季风向比较集中,更有利于沙的输移,易造成沙漠道路因沙的输移堆积而中断通车;夏季风况复杂,风向难以保持稳定,RDD表现为几处相反方向的共同主导作用,多方向输沙活动为风沙防治带来较大困难。

(a1) 尉犁春季
DP=46.91 VU
RDP=19.36 VU
RDD=228.77°
RDP/DP=0.41

(a2) 尉犁夏季
DP=46.49 VU
RDP=29.55 VU
RDD=199.79°
RDP/DP=0.64

(a3) 尉犁秋季
DP=12.14 VU
RDP=5.24 VU
RDD=233.09°
RDP/DP=0.43

(a4) 尉犁冬季
DP=0.94 VU
RDP=0.13 VU
RDD=294.50°
RDP/DP=0.14

(b1) 点一春季
DP=67.10 VU
RDP=38.67 VU
RDD=260.08°
RDP/DP=0.58

(b2) 点一夏季
DP=63.06 VU
RDP=35.86 VU
RDD=226.12°
RDP/DP=0.57

(b3) 点一秋季
DP=20.09 VU
RDP=13.00 VU
RDD=264.85°
RDP/DP=0.65

(b4) 点一冬季
DP=2.70 VU
RDP=2.01 VU
RDD=275.27°
RDP/DP=0.75

(c1) 点二春季
DP=128.22 VU
RDP=97.74 VU
RDD=260.64°
RDP/DP=0.76

(c2) 点二夏季
DP=98.49 VU
RDP=67.32 VU
RDD=245°
RDP/DP=0.68

(c3) 点二秋季
DP=46.21 VU
RDP=38.95 VU
RDD=261.99°
RDP/DP=0.84

(c4) 点二冬季
DP=9.70 VU
RDP=8.23 VU
RDD=260.72°
RDP/DP=0.85

(d1) 点三春季
DP=129.66 VU
RDP=89.10 VU
RDD=245.22°
RDP/DP=0.69

(d2) 点三夏季
DP=104.01 VU
RDP=72.69 VU
RDD=233.64°
RDP/DP=0.70

(d3) 点三秋季
DP=48.48 VU
RDP=39.64 VU
RDD=246.34°
RDP/DP=0.82

(d4) 点三冬季
DP=11.51 VU
RDP=8.54 VU
RDD=242.95°
RDP/DP=0.74

(e1) 且末春季
DP=132.91 VU
RDP=80.11 VU
RDD=241.94°
RDP/DP=0.60

(e2) 且末夏季
DP=94.72 VU
RDP=61.83 VU
RDD=232.74°
RDP/DP=0.65

(e3) 且末秋季
DP=51.87 VU
RDP=41.44 VU
RDD=242.23°
RDP/DP=0.80

(e4) 且末冬季
DP=13.61 VU
RDP=9.21 VU
RDD=241.05°
RDP/DP=0.68

图9 各区段季DP特征

Fig. 9 Seasonal DP characteristics in each section

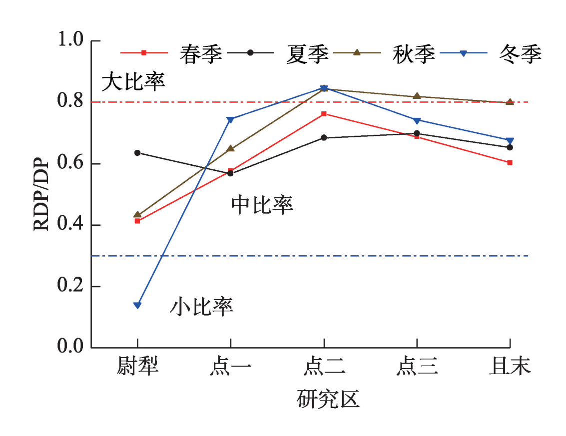


图10 各区段季RDP/DP特征

Fig. 10 Seasonal RDP/DP characteristics in each section

3.3 沿线沙丘移动特征

勘测结果表明，沙漠公路沿线地貌为高大复合型沙丘及盆地相间地貌，其中复合型沙丘平面上多分布着次级沙丘，次级沙丘皆为流动沙丘。通过对流动沙丘追踪，计算得出各区段内沙丘移动速率和移动方向(表2)，沙丘移动速率介于3.05~5.03 m·a^{-1}，移动速率最小值发生在点一区段内，为3.05 m·a^{-1}，移动速率最大值发生在点三区段内，为5.03 m·a^{-1}，移动方向介于186.78°~245.59°。数据表明，沿线区段沙丘移动速率呈现空间变化特征，公路北部沙丘移动速率较低，南部沙丘移动速率较高。沿线起沙风频率由尉犁至且末递增，起沙风是沙丘移动的动力因素，沙丘移动速率的差异表明起沙风特征并不是唯一决定沙丘移动特征的因素，点一区段的沙丘移动速率和方向说明，存在其他因素影响着沙丘移动，如沙丘体积和沙丘密度等。

尉-且沙漠公路沙害严重段主要集中在公路南部，结合图8和图9来看，南部也即点二至且末3处区段的沙丘移动速率较大，此3处区段内沙丘移动方向与年RDD存在良好的一致性。图8和图10的

表2 各区段沙丘移动特征

Tab. 2 Dune movement characteristics in each section

沙丘移动特征	尉犁	点一	点二	点三	且末
沙丘移动速率/m·a⁻¹	3.74	3.05	3.97	5.03	4.99
沙丘移动方向/(°)	209.11	186.78	239.36	234.20	245.59

RDP/DP表明此3处区段的风向稳定，RDP/DP代表风向变率，同时也是影响沙丘移动特征的重要因素，此3处区段风向稳定且集中，因此易造成严重的沙害。

4 讨 论

4.1 沿线风沙危害及成因

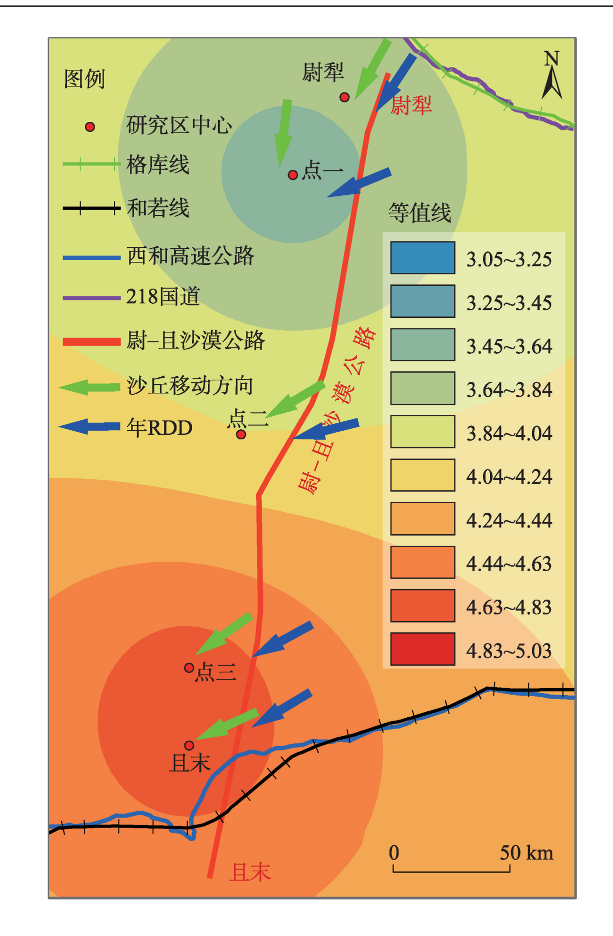
尉-且沙漠公路沙害出现的原因为自然环境恶劣，气候干旱、沿线风沙严重。稀疏植被为风沙活动提供了前提条件，起沙风为区段内风沙活动提供了动力基础，充足的沙源提供了沙害的物质，同时沙漠公路的穿行扰动了局部风的平衡，破坏了沙丘稳定性，将不可避免的遭受沙害。由于地貌形态、风沙环境以及沙漠公路与起沙风存在夹角等原因，尉-且沙漠公路沿线遭受不同程度、形式的风沙危害。

根据研究所得的沙丘移动速率，通过等值线图（图11）可以得出沙漠公路沿线的输沙活动强度，直观表现出沿线各处的风沙危害程度。尉犁、点一区段内沙丘移动方向与公路走向近乎平行，且沙丘移动速率较小，对沙漠公路的危害较小。点二至且末区段内沙丘移动方向与年RDD有良好的一致性，输沙活动方向与公路走向呈现较大的夹角，点三和且末2处区段内，沙丘移动速率达沿线最值，说明此两处区段沙漠公路极易遭受较大的风沙危害。

尉-且沙漠公路整体走向为南北向，除尉犁区段外，点一至且末4处区段内输沙主导方向与沙漠公路走向之间呈现出较大夹角（图11），沙漠公路遭受风沙危害的威胁较大。季DP特征（图9）表明，沙漠公路沿线春夏两季输沙活动最强烈且输沙方向稳定，强烈的输沙活动为沙漠公路带来充足的沙源。从图9中可以看出，5处区段内春夏两季的输沙活动方向均与沙漠公路的走向呈现较大夹角，且输沙活动主要在公路的1侧发生，因此应加强公路上风侧的风沙防治。

4.2 风沙防治体系

公路沙害来自于风沙流，影响风沙流强弱的因素主要为动力因素和物质因素[22,28]。因此，公路的沙害防治亦着眼于2点：一是控制动力因素，使气流中的细沙在远离路基的地方堆积；二是制约沙质地表风蚀的过程。公路沙害的防治措施也是多种多样的，主要包括工程、生物治沙措施[22,1]。



注：RDD为合成输沙方向。

图11 沙漠公路走向与年RDD

Fig. 11 Desert highway direction and annual RDD

由于沿线风沙环境的时空变化特征，因此沙漠公路沿线防沙体系的设置应充分考虑公路走向与输沙方向的夹角变化和起沙风方向的变化[6]。尉犁、点一2区段内公路走向与沙丘移动方向近乎平行，此2处区段内的RDP/DP较小（图10），风向较易发生变化，防治体系最外侧高立式沙障采取折线型方式（图12），相比于直线型沙障，其积沙效果更显著；研究结果表明，沙漠公路沿线春夏两季的输沙活动较为强烈，且方向稳定不易变化（图9），因此公路上风向受风沙威胁较大，点二至且末3处区段沙丘移动方向与沙漠公路成较大夹角（图11），故部分区段采取直线形高立式沙障。

沙漠公路沿线的风沙防治应做到因地制宜，合理地设置沙防治宽度以减少资金和人力投入[29]，根

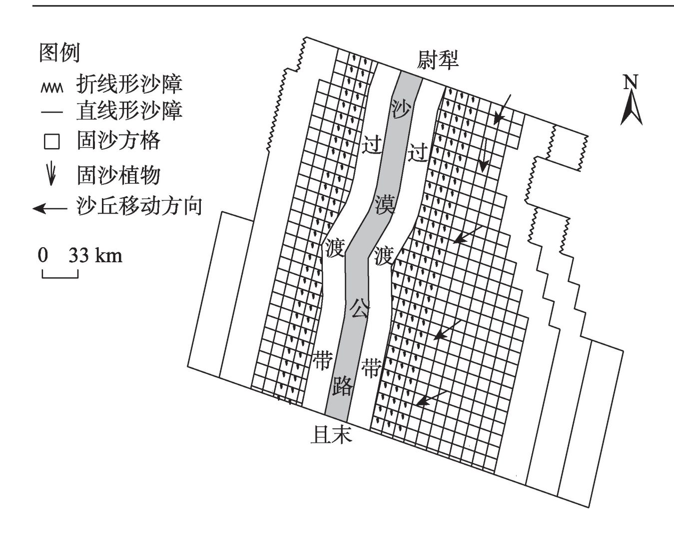


图12　尉犁-且末沙漠公路风沙防治体系

Fig. 12　Sand control system of Yuli-Qiemo Desert Highway

据沿线风沙环境的空间变化特征对防沙体系做出调整，进行有针对性的风沙防治[30-31]。沙漠公路沿线风沙活动强度不同，尉犁、点一区段沙丘移动速率较低，为低风能环境，因此相应的减少风沙防治体系的宽度。点二至且末区段沙丘移动速率较大，为中风能环境，风沙环境恶劣，公路沿线极易遭受风沙危害，且此3处区段内起沙风较为集中，输沙活动方向稳定，因此需增加此3处区段内的风沙防治体系宽度，尤其公路的上风侧。目前，沙漠道路的风沙防治体系宽度并没有明确的标准，参考前人的研究成果[32-33]，点三、且末2处区段上风侧固沙方格的宽度设为110 m，尉犁至点二3处区段内上风侧固沙方格宽度根据沙丘移动速率进行相应的折减，分别为67 m、55 m、70 m，下风侧固沙方格宽度按照上风侧的一半设置，高立式沙障间隔为10 m。

沙漠公路沿线整体风沙防治体系的布置如图12所示，综合沿线风沙环境的时空变化特征及沙漠公路的走向，有针对性的对公路进行防护。防治体系采用以阻-固结合的防治思路，高立式沙障设置在防治体系的最外侧，风沙流通过高立式沙障后，强度减弱，进入配合设置的草方格内，从而被固定。沿线根据水文条件，在靠近公路的固沙草方格内培育植物，前期草方格也能减弱风沙对植物侵蚀，提高植物的存活率，从而形成沙漠公路的综合风沙防治体系。

5　结　论

（1）尉-且沙漠公路沿线起沙风呈现出时空变化特征，尉犁至且末起沙风频率表现出递增趋势，平均起沙风速先增后减，在点二区段内达到最值，沿线起沙风主方向为ENE和E。沙漠公路沿线四季起沙风特征与年起沙风特征表现出良好的一致性，春夏两季起沙风占主导地位。

（2）尉-且沙漠公路沿线输沙活动强度具有时空变化特征。尉犁、点一区段内DP分别为106.48 VU和152.95 VU，为低风能环境，RDP/DP较小，起沙风向较易发生变化，2处区段内无明显主风向，整体风况表现出弱风、低输沙的特征。点二至且末3处区段内DP分别为282.64 VU、293.70 VU、293.11 VU，为中风能环境，RDP/DP较大，起沙风向稳定，3处区段表现出单一起沙风占主导地位，整体风况表现出强风、高输沙的特征。与起沙风特征一致，沿线春夏两季输沙活动强烈，在此期间内，极易对沙漠公路造成较大危害。

（3）尉-且沙漠公路沿线沙丘移动特征与沿线风沙环境紧密相关，在尉犁和点一区段内，弱风、低输沙的环境使得沙丘移动速率较小，在点二至且末区段内，强风、高输沙的环境使得沙丘移动速率增大，输沙方向集中，沙漠公路极易遭受风沙危害。根据研究结果，在沙漠公路沿线设置了阻-固结合的防沙体系，工程防沙与生物防沙并存，根据风能环境和沙丘移动特征，结合公路的走向合理调整高立式沙障和固沙方格的宽度，做到节约、有效的防风治沙。

参考文献（References）

[1]　Li C J, Wang Y D, Lei J Q, et al. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan Desert Highway in China[J]. Journal of Arid Land, 2021, 13(1): 98-106.

[2]　马奔腾, 程建军, 雷加强, 等. 南疆塔中-38团沙漠公路沿线风沙输移规律与防沙体系研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1663-1672. [Ma Benteng, Cheng Jianjun, Lei Jiaqiang, et al. Transport law and control system of wind-blown sand along the desert highway of south Xinjiang Tazhong-38th Corp[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1663-1672.]

[3]　Dong Z B, Chen G T, He X D, et al. Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(3): 329-344.

[4]　Yang H, Cao J S, Hou X L. Characteristics of aeolian dune, wind regime and sand transport in Hobq Desert, China[J]. Applied Sciences, 2019, 9(24): 5543, doi: 10.3390/app9245543.

[5] Yang Y Y, Qu Z Q, Shi P J, et al. Wind regime and sand transport in the corridor between the Badain Jaran and Tengger Deserts, central Alxa Plateau, China[J]. Aeolian Research, 2014, 12: 143–156.

[6] Ma B T, Gao L, Cheng J J, et al. Characteristics and hazards of aeolian sand environment along railways in the southeastern fringe of the Taklimakan Desert and sand control measures[J]. Applied Sciences-Basel, 2022, 12(18): 9186, doi: 10.3390/app12189186.

[7] Pi H W, Sharratt B, Lei J Q. Windblown sediment transport and loss in a desert-oasis ecotone in the Tarim Basin[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 7723, doi: 10.1038/s41598-017-04971-4.

[8] Wang X M, Dong Z B, Yan P, et al. Wind energy environments and dunefield activity in the Chinese deserts[J]. Geomorphology, 2005, 65(1–2): 33–48.

[9] 鱼燕萍, 张克存, 安志山, 等. 敦煌-格尔木铁路沿线风动力环境特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 41–48. [Yu Yanping, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Dynamic environment of wind along the Dunhuang-Golmud Railway[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 41–48.]

[10] 罗凤敏, 高君亮, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘起沙风风况及输沙特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 145–152. [Luo Fengmin, Gao Junliang, Xin Zhiming, et al. Characteristics of sand-driving wind regime and sediment transport in northeast edge of Ulan Buh Desert[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 145–152.]

[11] Dong Z B, Zhang Z C, Lü P, et al. Analysis of the wind regime in context of dune geomorphology for the Kumtagh Desert, northwest China[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 2012, 56(4): 459–475.

[12] Meng N, Wang N A, Zhao L Q, et al. Wind regimes and associated sand dune types in the hinterland of the Badain Jaran Desert, China[J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(5): 473–489.

[13] Zhang K C, Qu J J, An Z S. Characteristics of wind-blown sand and near-surface wind regime in the Tengger Desert, China[J]. Aeolian Research, 2012, 6: 83–88.

[14] Zu R P, Xue X, Qiang M R, et al. Characteristics of near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert, China[J]. Geomorphology, 2008, 96(1–2): 39–47.

[15] Zhang Y, Zhang Z C. Dune field patterns and their control factors in the middle areas of China's Hexi Corridor Desert[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 818338, doi: 10.3389/feart.2022.818338.

[16] Hu Z H, Gao X, Lei J Q, et al. Geomorphology of aeolian dunes in the western Sahara Desert[J]. Geomorphology, 2021, 392: 107916, doi: 10.1016/j.geomorph.2021.107916.

[17] Huang N, Xia X P, Tong D. Numerical simulation of wind sand movement in straw checkerboard barriers[J]. European Physical Journal, 2013, 36(9): 99, doi: 10.1140/epje/i2013-13099-6.

[18] Li B, Sherman D J. Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review[J]. Aeolian Research, 2015, 17: 33–48.

[19] Lima I A, Parteli E J R, Shao Y P, et al. CFD simulation of the wind field over a terrain with sand fences: Critical spacing for the wind shear velocity[J]. Aeolian Research, 2020, 43: 100574, doi: 10.1016/j.aeolia.2020.100574.

[20] Xie S B, Qu J J, Lai Y M, et al. Formation mechanism and suitable controlling pattern of sand hazards at Honglianghe River section of Qinghai-Tibet Railway[J]. Natural Hazards, 2015, 76(2): 855–871.

[21] Xie S B, Zhang X, Pang Y J. Wind dynamic characteristics and wind tunnel simulation of subgrade sand hazard in the Shannan wide valley of the Sichuan-Tibet Railway[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(14): 8341, doi: 10.3390/ijerph19148341.

[22] Zhang K C, Qu J J, Liao K T, et al. Damage by wind-blown sand and its control along Qinghai-Tibet Railway in China[J]. Aeolian Research, 2010, 1(3–4): 143–146.

[23] Liu L, Bo T L. Effects of checkerboard sand barrier belt on sand transport and dune advance[J]. Aeolian Research, 2020, 42: 100546, doi: 10.1016/j.aeolia.2019.100546.

[24] 丁录胜, 程建军, 陈柏羽, 等. 铁路高立式芦苇沙障防风阻沙的现场测试与流场模拟计算[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 156–162. [Ding Lusheng, Cheng Jianjun, Chen Boyu, et al. Field test and numerical simulation of windbreak and sand-resisting on high-parallel reed sand-barriers along railway[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 156–162.]

[25] 陈柏羽, 程建军, 李生宇. 新疆S214省道高立式芦苇沙障合理间距分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 782–789. [Chen Boyu, Cheng Jianjun, Li Shengyu. Reasonable spacing of high-parallel reed sand barriers along the Xinjiang S214 provincial highway[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 782–789.]

[26] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime[C]//Mckee E D. A study of global sand seas. Washington: United States Government Printing Office, 1979: 137–169.

[27] 周成龙, 杨兴华, 刘厚勇, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区的风动力环境[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 218–222. [Zhou Chenglong, Yang Xinghua, Liu Houyong, et al. Wind power environment of Tazhong area in hinterland of Taklimakan Desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(3): 218–222.]

[28] Ma N, Guo Q, Li Y et al. Overview of the measures and techniques used to protect traffic lines against shifting sands in China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(1): 124–135.

[29] Liu B L, Wang Z Y, Qu J J, et al. A new index to determine the optimal width of sand control project[J]. Aeolian Research, 2021, 51: 100707, doi: 10.1016/j.aeolia.2021.100707.

[30] 顿耀权, 屈建军, 康文岩, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 66–74. [Dun Yaoquan, Qu Jianjun, Kang Wenyan, et al. Progress and prospect of research on the protective system of Shapotou section of the Baotou-Lanzhou Railway[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 66–74.]

[31] 金昌宁, 张玉红. 塔克拉玛干沙漠公路机械防沙体系成本最小化探讨[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 4–8. [Jin Changning, Zhang

Yuhong. Discussion on cost minimization of mechanical sand control system for Taklimakan Desert Highway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(5): 4-8.]

[32] 徐峻龄, 裴章勤, 王仁化. 半隐蔽式麦草方格沙障防护带宽度的探讨[J]. 中国沙漠, 1982, 2(3): 20-27. [Xu Junling, Pei Zhangqin, Wang Renhua. A research on the width of the protection belt of half-hidden straw checkerboard barriers[J]. Journal of Desert Research, 1982, 2(3): 20-27.]

[33] 王训明, 陈广庭. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益评价及防沙带合理宽度的初步探讨[J]. 干旱区资源与环境, 1997, 11(4): 29-36. [Wang Xunming, Chen Guangting. Efficiencies and reasonable width for the mechanical sand-prevention system along the Tarim Desert Highway[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1997, 11(4): 29-36.]

Characteristics of wind-sand environment and control measures of sand damage along Yuli-Qiemo Desert Highway

ZHENG Zhipeng, MA Benteng, CHENG Jianjun, WEI Jinming

(College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China)

Abstract: The Yuli-Qiemo Desert Highway, through the Taklimakan Desert hinterland, can provide strong support to realize social stability and long-term security in Xinjiang, China. Wind and sand hazards are the main obstacles to the construction and opening of the Yuli-Qiemo Desert Highway, hence preventive and control measures are urgently needed to protect the highway. Based on ERA5 wind data, this study analyzed the wind energy environment along the Yuli-Qiemo Desert Highway, combined with remote sensing images to analyze the dune movement characteristics along the highway. In addition, the wind and sand hazards along the highway were systematically elaborated based on which the targeted wind and sand prevention and control measures were proposed for the highway. The following results were observed. (1) The annual average wind speed of sand ranged from 6.03 $m \cdot s^{-1}$ to 6.64 $m \cdot s^{-1}$, and the annual wind frequency ranged from 14.73% to 30.44%. (2) Sandy winds occurred mainly in spring and summer. The main direction of sandy wind is dominated by ENE and E. (3) The annual sand transport potential along the line ranges from 106.48 VU to 293.70 VU, with two types of wind environments, i.e., low and medium. The annual directional variability index ranges from 0.49 to 0.74, indicating a medium ratio, and the annual synthetic sand transport direction ranges between 213.48° and 255.94°. The seasonal sand transport potential in each direction is consistent with the frequency change of seasonal sand winds, and the directional variability index shows obvious seasonal change characteristics. The spatial and temporal variability of the wind energy environment causes the spatial variability of the dune movement rate. Under the action of sand-driving winds, different degrees of wind and sand hazards are suffered along the route. Therefore, targeted engineering and biological control measures are set up along the route according to the blocking-fixing principle. This study provides a comprehensive overview of the environmental characteristics and hazards of wind and sand along the Yuli-Qiemo Desert Highway and provides a theoretical basis for the setup and subsequent improvement and optimization of the control measures along the highway.

Key words: sandy wind; sand transport potential; wind and sand hazards; prevention and control measures; desert highway